

引用格式:孙才志,张梦飞. 中国海洋等效虚拟水初步测算及结构性特征分析[J]. 资源科学, 2018, 40(9): 1843-1854. [Sun C Z, Zhang M F. Preliminary calculation and structural analysis of China's marine equivalent virtual water[J]. *Resources Science*, 2018, 40(9): 1843-1854.] DOI: 10.18402/resci.2018.09.14

# 中国海洋等效虚拟水初步测算及结构性特征分析

孙才志, 张梦飞

(辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 大连 116029)

**摘要:**本文提出“海洋等效虚拟水”概念,以陆海统筹思想为指导,采取陆海同功能产品或服务可等效转换的思路,从食物、废水净化、发电三个角度分别提出“海洋食物等效虚拟水”、“海洋环境等效虚拟水”和“海洋能源等效虚拟水”。以中国沿海地区为研究区域,探究在海洋开发与利用过程中海洋产品或服务对陆地淡水资源的等效替代能力。研究结果显示,中国海洋等效虚拟水总量呈U型变化趋势,从2006年的182.05亿 $\text{m}^3$ ,先下降到2011年的145.03亿 $\text{m}^3$ ,又上升到2014年的165.68亿 $\text{m}^3$ 。研究期间海洋等效虚拟水含量占用水量的比例达6.4%,未来海水养殖等效虚拟水和海上风电等效虚拟水的显著增加将促进海洋等效虚拟水含量进一步提高。此外,本文根据中国海洋等效虚拟水结构性特征提出优化方向,并根据各省市海洋等效虚拟水结构性特征提出具体的优化设计,为中国沿海地区海洋等效虚拟水的发展提供借鉴。海洋等效虚拟水的稳定供给必须在海洋资源、环境可持续发展的前提下实现,合理利用海洋实现陆地水资源补充是解决沿海地区未来水资源难题的重要途径。

**关键词:**海洋等效虚拟水;海洋食物等效虚拟水;海洋环境等效虚拟水;海洋能源等效虚拟水;中国沿海地区

DOI: 10.18402/resci.2018.09.14

## 1 引言

水资源作为人类生存发展最基础的自然资源,是国家发展的根基<sup>[1]</sup>。然而,中国沿海地区经济要素集聚以及城市化发展,不但加剧了水资源短缺,更造成不同程度的水污染,水资源安全存在危机隐患<sup>[2]</sup>。海洋作为沿海地区优越于内陆地区的重要战略资源,素有“蓝色国土”之称,开发潜力广阔<sup>[3]</sup>。在当今“陆海统筹”背景下<sup>[4]</sup>,向海洋进军与可持续发展要求人们必须探寻海洋与陆地的有效整合途径,通过合理开发和利用海洋,缓解陆地水资源供给压力。

虚拟水概念于1993年由Allan正式提出,定义为农产品生产所需的水资源量<sup>[5]</sup>,经过Hoekstra进一步拓展,研究领域由农产品生产拓展至工业产品生产及相关服务<sup>[6]</sup>。虚拟水战略是当前缺水国家安全战略的重要组成部分<sup>[7]</sup>,通过虚拟水贸易,水资源密集型产品特别是粮食作物由富水地区转移至缺水地区,从而保障了缺水地区的水粮安全,虚拟水贸

易也成为解决地区水资源短缺问题的新思路<sup>[8,9]</sup>。陆地活动是当前虚拟水研究的重点<sup>[10-12]</sup>,但海洋作为占据全球表面积71%的巨大水体不容忽视。不消耗陆地淡水资源的海洋产品或服务,却服务于陆地活动,而与其功能相同的陆地产品在生产或服务过程中,却需要大量淡水资源。通过构建陆海连接方式,获得海洋产品或服务功能等效的陆地产品或服务的虚拟水量,便是海洋为陆地供给、补偿的淡水资源量。由此,尝试提出“海洋等效虚拟水”概念,通过合理利用海洋,为沿海地区水资源可持续发展提供借鉴。

## 2 海洋等效虚拟水的理论基础、概念及内涵属性

### 2.1 理论基础

#### 2.1.1 比较优势理论

区域内的要素禀赋差异是区域内资源比较优势存在的前提。沿海地区气候适宜,农业基础较

收稿日期: 2017-10-09; 修订日期: 2018-07-17

基金项目: 国家社会科学重点项目(16AJY009)。

作者简介: 孙才志,男,山东烟台人,教授,博士生导师,主要从事水资源与海洋经济研究。E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

好,但经济社会的发展使得水资源较为紧张。同时,由于沿海地区的临海性使得海洋产品和服务获取与使用的便捷程度大大提高,海洋资源要素禀赋逐渐成为地区具有比较优势的部分。区域比较优势对指导水资源管理具有重要意义<sup>[13]</sup>。

### 2.1.2 资源流动理论

物质和能量伴随人类活动在资源-环境-社会系统中进行流动和转移,资源流动注重过程,反映资源量的动态变化。市场机制促进了陆海资源的流通,其在区域间的转移为解决资源环境问题提供了途径<sup>[14]</sup>。

### 2.1.3 资源替代理论

资源替代理论是可持续发展经济的基本原理之一,发现并更加有效利用新的资源是社会发展的必然,也是环境保护的需要。水资源在作用上是不可替代的,但就一个区域而言,水资源在可获得性上具有替代性。由于海洋产品和服务作用于陆地,因此可以替代陆地进行同类生产服务的部分水资源,是资源功能替代的作用<sup>[15]</sup>。

## 2.2 海洋等效虚拟水概念

以陆海统筹思想为指导,按照陆海同功能产品或服务可等效转化的思路,在虚拟水理论的基础上,提出“海洋等效虚拟水”,定义为:在海洋资源开发与利用过程中,嵌入在海洋产品或服务中等效于相应陆地产品或服务的淡水资源。

本文研究海洋等效虚拟水包括三部分:

(1)海洋蓝色农业作为沿海地区的物质保障由来已久,其与陆地粮食作物起到同等重要的供能作用<sup>[16]</sup>。以海洋渔业资源为陆地提供食物的角度提出“海洋食物等效虚拟水”。

(2)海洋可以通过自净促进污染物的稀释、吸收、沉降和转化<sup>[17]</sup>,与陆地淡水资源起到同等效果的废水消纳作用。以海洋对陆源废水进行净化的角度提出“海洋环境等效虚拟水”。

(3)海洋风、潮汐、核电等利用海洋资源的新型能源发电,与陆域发电同等支持陆地活动<sup>[18]</sup>。以海洋为陆地供给电能的角度提出“海洋能源等效虚拟水”。

### 2.2.1 海洋食物等效虚拟水概念

能量是食物的第一属性。在营养学中,能量是指食品中蛋白质、脂肪、碳水化合物等产能营养素

在体内氧化代谢过程中产生的能量总和,一般用焦耳(J)表示。根据能量守恒定律,能量只能从一种形式变为另一种形式而无法凭空产生或者是消灭,为研究奠定了理论基础;联合国粮农组织也曾提出,不同种类作物在一定生产水平的产量可以进行换算,为研究奠定了现实基础。人类生命活动离不开粮食作物的能量供给,同时海洋渔业资源中也富含丰富的能量,不同来源的供能物质在本质上具有一致性,通过海洋渔业资源与陆地粮食作物的能量等值转换,可获得与海洋渔业资源能量对应的粮食作物产量。海洋渔业资源对粮食作物的替代相当于从海洋中引入等量的粮食作物生长所需淡水资源。因此,将嵌入在海洋渔业资源中等效于粮食作物生长所需的淡水资源定义为海洋食物等效虚拟水。

### 2.2.2 海洋环境等效虚拟水概念

由灰水足迹的概念可知<sup>[19]</sup>,排放到自然界中的一定浓度的污染物需要水资源稀释才能达到相应环境水质标准,若陆地产生的废水全部由陆域水体消纳,势必需要大量水资源。而沿海省份的临海性使得部分陆源废水排入海洋,利用海洋自净能力实现陆域废水清洁。海洋纳污相当于补充了大量陆地水资源用于陆域废水净化。因此,将嵌入在海水资源中等效于陆域废水净化所需的淡水资源定义为海洋环境等效虚拟水。

### 2.2.3 海洋能源等效虚拟水概念

海洋风能、潮汐能作为海洋清洁能源可以转换为电能补给陆地,运作过程几乎没有水耗,国内已建核电站全部修建于滨海地区,大多利用海水实现发电过程冷却。但作为中国电力结构支柱的煤电在煤炭开采及冷却过程中却需要消耗大量淡水。利用海洋发电相当于补充了淡水资源支持等量燃煤火力发电。因此,将嵌入在海洋新能源发电过程中等效于煤电所需的淡水资源定义为海洋能源等效虚拟水。

## 2.3 海洋等效虚拟水内涵属性

### 2.3.1 整体性

海洋等效虚拟水与陆地水资源系统并不是相互独立的,而是共同服务于生产生活,相互补充,相互联系形成统一的有机整体。

### 2.3.2 经济性与流动性

水资源作为经济资源是国民经济发展的动力,

2018年9月

其有用性标志着其经济性。海洋食物等效虚拟水的流动性发生在其获取及流通过程中,从海洋流动到陆地,再随着渔业贸易由海洋食物等效虚拟水富庶地区流向稀缺地区;海洋能源等效虚拟水的流动性则发生在电力的获取与传输过程中。

### 2.3.3 地域性

沿海不同区域海洋渔业资源及粮食作物的种类和禀赋不同,使得海洋食物等效虚拟水地区间分布不均;海洋的自净能力受到海域开阔程度、水流流动性等因素影响,使得可提供的海洋环境等效虚拟水限度存在地域性差异;海洋发电选址较为苛刻,发电能力受自然因素影响大,使得海洋能源等效虚拟水地区分布不均。

### 2.3.4 可再生性与有限性

海洋渔业资源的繁殖、海洋自净能力的恢复性以及海洋风能潮汐能的持续性使得海洋等效虚拟水具有可再生性,但这种可再生性需要在不破坏当前环境及其自身循环规律的前提下进行。若过度捕捞和养殖、废水过度排海以及海洋新能源过度开发,则海洋等效虚拟水的持续供应将不可保障。

## 3 研究区概况

研究区为中国沿海11省、市、自治区(港澳台除外),南北纬跨度约40度,气候差异明显。陆地面积约为130万 $\text{km}^2$ ,全部位于季风气候区,雨热同期,粮食作物自北向南需水量逐渐增大。大陆海岸线长约1.8万 $\text{km}$ ,海域面积约为300万 $\text{km}^2$ ,各海区海洋环境物理特性差异显著,最具捕捞价值的海洋生物约3300余种,在中国管辖海域中渔场个数有70余个。研究区丰富的陆海资源哺育了大量人口,便利的区位条件促进了经济的迅速发展,然而在经济开发与城市化发展过程中,随着人口、经济密度增大,陆地水资源质、量受到严重威胁。沿海地区人均水资源拥有量区际分布不均(图1),近15年来,有6个省市低于世界缺水警戒线1700 $\text{m}^3$ 。海洋水体可以通过物理、化学、生物过程促进排海污染物的浓度降低甚至消失,然而这种自净能力也是有限的,近岸海域已出现不同程度的海洋污染,全国平均出现轻度富营养化状况。海洋风能、潮汐能等新能源的利用也存在创新与规划不足等问题。合理开发利用海洋是海洋等效虚拟水可持续供给的前提,也是

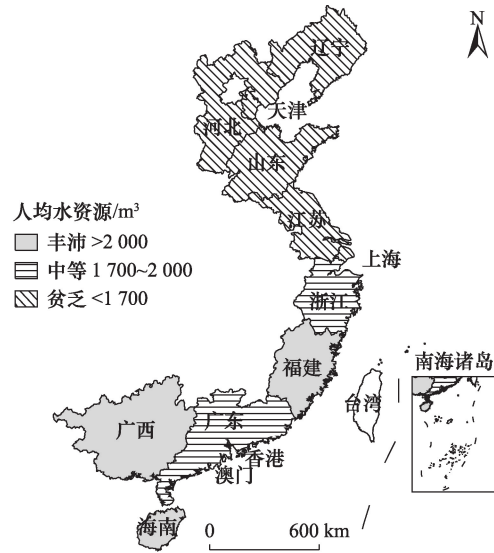


图1 研究区位及其人均水资源状况

Figure 1 Research location and its status of per capita water resource

解决未来沿海地区水资源难题的重要途径。

## 4 研究方法 with 数据来源

### 4.1 海洋食物等效虚拟水

#### 4.1.1 海洋渔业资源能量供给

海洋渔业资源主要由海洋捕捞、海水养殖和远洋捕捞三种方式提供,其中,远洋捕捞操作位于国际公海区域,但所得可供沿海地区使用,因此将其纳入研究范围;其他海洋渔业资源均来源于中国渤、黄、东、南四大海域,其中,辽宁、河北、天津和山东的渔区位于渤海和黄海,江苏、浙江的渔区位于黄海和东海,上海的渔区位于东海,福建的渔区位于东海和南海,广东、广西和海南的渔区全部位于南海。为保证计算更加贴近现实,需要对各省份主要渔种进行筛选,原因如下:①由于地域性,在临近海域进行捕捞的省份渔种存在相似性,而在不同海域进行捕捞的省份渔种差异较大;②南方海域渔种相对较为丰富,产量大的种类较多,而北方海域渔种相对较少,产量大的种类较少;③每种海渔种类能量值不同。鉴于此,以《中国渔业统计年鉴》<sup>[20]</sup> 2001—2015年数据为基础,按照产量大、产量占比高、产量稳定性高等原则选取代表性强的渔种进行该类别能量值均值计算。计算结果如表1所示。

对于 $j$ 省市,海洋渔业资源总能量是指通过海洋捕捞、海水养殖以及远洋捕捞三种方式获得的海洋渔业资源总量的能量值,计算公式如下:



表1 中国沿海地区海洋渔业不同类别单位质量能量值

Table 1 Unit quality energy of different categories of marine fisheries in coastal areas of China													(kJ/100g)
方式	序号	类别	天津	河北	辽宁	上海	江苏	浙江	福建	山东	广东	广西	海南
海洋捕捞	1	鱼	632	553	519	490	527	515	515	544	519	502	506
	2	虾	339	360	360	389	373	373	373	373	373	373	385
	3	蟹	398	398	368	398	398	398	398	398	368	368	368
	4	贝	255	268	255	293	293	293	293	255	293	326	306
	5	藻(干)	—	—	607	—	712	749	837	607	837	837	992
	6	头足	314	410	410	410	410	410	410	410	410	410	410
	7	其他	222	222	222	222	222	222	222	222	222	222	222
海水养殖	8	鱼	414	414	414	423	452	423	414	427	427	435	419
	9	虾	389	377	373	389	373	389	389	389	410	389	389
	10	蟹	398	398	398	—	398	368	368	398	335	335	335
	11	贝	—	268	255	—	293	293	293	255	293	326	306
	12	藻(干)	—	—	607	—	712	749	837	607	837	—	992
	13	其他	—	276	352	—	222	276	352	352	251	113	—
远洋捕捞	14	远洋捕捞	573	314	573	573	314	573	573	573	829	829	829

注:1.-表示无数据,其中海南省为不可食用的海水珍珠,其他省市表示该地此类别无产量;2.藻类因缺乏湿状态能量值,采用干状态能量值代替,计算时产量进行相应折算;3.甲壳类包括虾类和蟹类,由于同一地域能量值和产量差异较大因此将虾、蟹类分别统计计算。

$$ME = \sum_{i=1}^n MY_{ji} \times MCE_{ji} \quad i = 1, 2, \dots, n (n = 14) \quad (1)$$

式中ME为海洋渔业资源总能量(kJ);MY<sub>ji</sub>为j省市第i种海洋渔业类别的产量(t);MCE<sub>ji</sub>为j省市第i种海洋渔业类别单位质量能量值(kJ/100g)。

4.1.2 粮食作物虚拟水计算

稻谷、小麦和玉米是中国沿海地区最主要的粮食作物,研究期间三大粮食作物总产量在沿海各省市占比均达到80%以上,各省市产量最高的粮食作物在该省市占比均达到45%以上,最高可达80%。因此选择区域内产量最高的粮食作物作为海洋能量转换基础。通过对2001—2015年各地区粮食作物产量统计,选择稻谷作为上海、江苏、浙江、福建、广东、广西和海南的转换粮食作物,小麦作为天津、河北和山东转换粮食作物,玉米作为辽宁的转换粮食作物。

参考国内外虚拟水文献,粮食作物虚拟水计算公式如下:

$$GVW = GW/GY \quad (2)$$

式中GVW为选定粮食作物单位质量虚拟水含量(m<sup>3</sup>/kg);GW为选定粮食作物单位面积需水量(m<sup>3</sup>/hm<sup>3</sup>);GY为选定粮食作物单位面积产量(kg/hm<sup>3</sup>)。

4.1.3 海洋食物等效虚拟水计算

首先,将海洋渔业总能量转换为海洋虚拟粮食

作物产量,再结合选定粮食作物的单位质量虚拟水含量得到最终结果,对于同一区域海洋虚拟粮食作物种类即选定粮食作物。计算公式如下:

$$MVG = ME/GE \quad (3)$$

$$MFW = MVG \times GVW \quad (4)$$

式中MVG为海洋虚拟粮食作物产量(t);GE为单位质量选定粮食作物能量值(kJ/100g);MFW为海洋食物等效虚拟水(m<sup>3</sup>)。若将海洋捕捞能量、海水养殖能量、远洋捕捞能量分别带入公式(3)ME处,则可分别得到海洋捕捞等效虚拟水(MCW)、海水养殖等效虚拟水(MUW)和远洋捕捞等效虚拟水(PFW)。

4.2 海洋环境等效虚拟水

直排入海污染源包括工业污染源、生活污染源和综合污染源,均是通过污水排放口向海洋排放废水,属于点源污染,主要污染物为化学需氧量(COD)和氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)。以《水足迹评价手册》<sup>[19]</sup>为依据,借鉴灰水足迹计算方法,计算公式如下:

$$MEV_i = L_i/C_{\max} - C_{nat} \quad (5)$$

$$MEW = \max(MEW_{COD}, MEW_{NH_4^+-N}) \quad (6)$$

式中MEV<sub>i</sub>为以第i类污染物为标准的海洋环境等效虚拟水(m<sup>3</sup>);L<sub>i</sub>为直排海第i类污染物排放负荷(kg/a);C<sub>nat</sub>为陆地受纳水体在自然状态下污染物的本底



2018年9月

浓度; $C_{max}$ 为陆地受纳水体对污染物的最大容许浓度; $MEW$ 为海洋环境等效虚拟水( $m^3$ )。

#### 4.3 海洋能源等效虚拟水

海洋风能和潮汐能是利用海洋空间和海洋能最成熟的发电方式,火力发电是沿海地区最主要的发电方式,冷却用水占火电用水的大部分,但火电冷却方式及耗水量南北差异较大,经查阅文献资料<sup>[21-23]</sup>,确定长江以北地区辽宁、河北、天津、山东、江苏五省市火电主要冷却方式为循环冷却,单位发电耗水量取 $1.9m^3/MWh$ ,长江以南地区上海、浙江、福建、广东、广西、海南六省市火电主要冷却方式为直流冷却,单位发电耗水量取 $1.2m^3/MWh$ 。在火力发电中,煤电约占93.5%,而采煤洗煤行业平均用水定额为 $0.47m^3/t$ 和 $0.27m^3/t$ 。核电站主要利用海水实现冷却,根据文献取单位发电耗水量为 $0.1m^3/MWh$ 。计算公式如下:

$$MWW = MWE \times (FPC + PSC \times CUW) \quad (7)$$

$$MTW = MTE \times (FPC + PSC \times CUW) \quad (8)$$

$$NW = NP \times NPC \quad (9)$$

$$MPW = MWW + MTW + NW \quad (10)$$

式中 $MWW$ 为海上风电等效虚拟水( $m^3$ ); $MWE$ 为海上风电发电量( $MWh$ ); $FPC$ 为煤电单位发电耗水量( $m^3/MWh$ ); $PSC$ 为发电标准煤耗( $g/kWh$ ); $CUW$ 为采煤和洗煤平均用水定额之和( $m^3/t$ ); $MTW$ 为潮汐发电等效虚拟水( $m^3$ ); $MTE$ 为潮汐发电量( $MWh$ ); $NW$ 为核电等效虚拟水( $m^3$ ); $NP$ 为核电发电量( $MWh$ ); $NPC$ 为核电单位发电耗水量( $m^3/MWh$ ); $MPW$ 为海洋能源等效虚拟水( $m^3$ )。

#### 4.4 海洋等效虚拟水

海洋食物等效虚拟水、海洋环境等效虚拟水和海洋能源等效虚拟水测度结果之和为海洋等效虚拟水。计算公式如下:

$$MVW = MFW + MEW + MPW \quad (11)$$

式中 $MVW$ 为海洋等效虚拟水( $m^3$ )。

#### 4.5 数据来源

本文所涉及的海洋捕捞、海水养殖和远洋捕捞产量数据来源于《中国渔业统计年鉴》<sup>[20]</sup>;粮食作物单位面积产量数据来源于《中国农村统计年鉴》<sup>[24]</sup>;能量等效换算过程中涉及的海洋渔业品种以及粮食作物品种的能量值来源于《中国食物成分表》<sup>[25]</sup>;不

同省份粮食作物单位面积需水量数据参考相关资料<sup>[26]</sup>。各地区直排海污染物排放量数据来源于《中国近岸海域环境质量公报》<sup>[27]</sup>,本文陆地受纳水体自然状态下污染物本底浓度假设为 $0^{[17]}$ ,陆地受纳水体对污染物的最大容许浓度,采用《污水综合排放标准》(GB8978—1996)<sup>[28]</sup>中一级排放标准,COD达标浓度为 $60mg/L$ , $NH_4^+-N$ 达标浓度为 $15mg/L$ 。海洋风能发电数据来源于《中国海洋统计年鉴》<sup>[29]</sup>,潮汐发电数据参考相关文献<sup>[30,31]</sup>,发电标准煤耗和核电发电量数据来源于《中国电力年鉴》<sup>[32]</sup>。

### 5 结果分析

#### 5.1 海洋等效虚拟水计算结果

根据上述公式,计算得到中国2001—2015年海洋食物等效虚拟水,总体呈上升趋势(由92.02亿 $m^3$ 上升到124.09亿 $m^3$ );由于2006年以前直排海污染物统计数据的缺乏,计算得到2006—2015年海洋环境等效虚拟水,总体呈下降趋势(由81.08亿 $m^3$ 下降到35.00亿 $m^3$ );受最新海洋统计数据的限制,计算得到2006—2014年海洋能源等效虚拟水,总体呈上升趋势(由2.33亿 $m^3$ 上升到6.11亿 $m^3$ );三者综合得到2006—2014年海洋等效虚拟水,2014年总量达165.68亿 $m^3$ ,研究期间海洋等效虚拟水总量占用水量比重达6.38%,占比最高的省份为海南,高达21.18%。具体计算结果如表2—表5(见第1849页)所示。

#### 5.2 中国海洋等效虚拟水结构性特征分析及优化方向

##### 5.2.1 中国海洋等效虚拟水结构性特征分析

海洋等效虚拟水结构性特征分析能够反映年际间海洋等效虚拟水的数量变化与组成差异,从而明确不同阶段海洋等效虚拟水变化的主导因素及发展趋势。研究期间,中国海洋等效虚拟水( $MVW$ )总量及海洋食物等效虚拟水( $MFW$ )、海洋环境等效虚拟水( $MEW$ )和海洋能源等效虚拟水( $MPW$ )的演变趋势如图2、图3(见第1849页)所示。

就 $MFW$ 而言,总量呈现上升趋势,由2001年的92.02亿 $m^3$ 上升到2015年的124.09亿 $m^3$ ,以2008年为界,呈先缓慢波动上升,再快速波动上升的特征,其对陆地水资源的补充能力由小变大,且补充强度呈现加快趋势。 $MFW$ 组成包括海洋捕捞等效虚拟水( $MCW$ )、海水养殖等效虚拟水( $MUW$ )和远洋捕

表2 中国海洋食物等效虚拟水

Table 2 China's marine food equivalent virtual water

(亿 m<sup>3</sup>)

年份	2001	2003	2005	2007	2009	2011	2013	2015
天津	0.35	0.42	0.36	0.38	0.33	0.32	0.80	0.82
河北	3.99	3.68	4.00	3.74	3.82	3.52	4.01	4.78
辽宁	17.88	15.58	17.06	17.56	22.35	18.78	19.61	24.80
上海	0.33	0.48	0.59	0.63	0.59	0.45	0.46	0.63
江苏	2.25	2.45	2.72	3.21	3.42	3.60	3.70	3.64
浙江	13.82	13.43	14.07	12.64	12.58	14.47	16.20	17.91
福建	16.84	17.05	17.43	16.71	17.13	17.67	18.68	20.64
山东	12.09	14.93	13.98	14.63	15.06	15.90	15.81	17.47
广东	13.82	14.10	15.37	15.88	16.29	16.60	18.12	17.77
广西	6.24	6.33	6.68	6.02	6.09	6.65	6.52	6.72
海南	4.40	5.93	8.13	6.55	7.03	7.70	8.00	8.90
总量	92.02	94.38	100.39	97.96	104.70	105.67	111.90	124.09

注:因篇幅限制,仅列出部分年份计算结果。

表3 中国海洋环境等效虚拟水

Table 3 China's marine environment equivalent virtual water

(亿 m<sup>3</sup>)

年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
天津	2.27	6.63	0.16	0.41	0.34	0.50	0.33	1.00	2.00	1.67
河北	0.80	0.80	0.66	0.46	0.49	0.67	0.33	0.50	0.33	0.83
辽宁	5.96	6.33	5.68	3.69	3.82	3.50	5.33	5.83	3.17	3.67
上海	2.28	1.90	2.38	1.49	1.29	1.17	1.00	0.67	1.17	1.17
江苏	1.32	0.66	0.65	1.34	0.48	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
浙江	21.29	16.28	15.70	15.39	15.07	13.83	14.00	14.50	13.83	13.67
福建	8.22	10.40	4.45	6.20	3.42	5.50	5.67	4.67	4.33	4.33
山东	9.26	7.86	4.69	3.71	3.71	3.67	3.67	3.50	3.67	3.83
广东	11.95	9.54	10.86	8.02	5.51	3.33	2.83	2.67	2.67	1.83
广西	14.44	5.87	4.02	2.78	0.76	1.17	1.50	1.50	2.00	2.17
海南	3.28	2.88	2.89	1.93	1.69	1.33	1.33	1.67	1.67	1.50
总量	81.08	69.14	52.14	45.43	36.56	35.00	36.33	36.83	35.17	35.00

表4 中国海洋能源等效虚拟水

Table 4 China's marine energy equivalent virtual water

(亿 m<sup>3</sup>)

年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
天津	-	-	-	-	-	0.05	0.05	0.06	0.06
河北	-	-	0.02	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
辽宁	0.02	0.03	0.06	0.09	0.15	0.21	0.27	0.38	0.47
上海	0.00	0.00	0.01	0.03	0.04	0.06	0.07	0.07	0.07
江苏	0.03	0.15	0.22	0.34	0.44	0.52	0.59	0.66	0.74
浙江	1.65	1.65	1.69	1.70	1.72	1.76	1.84	1.86	1.89
福建	0.02	0.04	0.05	0.11	0.15	0.19	0.24	0.36	0.47
山东	0.25	0.29	0.33	0.46	0.53	0.82	1.00	1.17	1.34
广东	0.35	0.36	0.38	0.43	0.51	0.67	0.76	0.81	0.96
广西	-	-	-	0.000 5	0.000 5	0.000 5	0.000 5	0.000 5	0.000 5
海南	0.00	0.00	0.01	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.06
总量	2.33	2.53	2.78	3.23	3.58	4.37	4.90	5.47	6.11

注:1.-表示无数据;2.广西因数值较小保留至四位小数。

2018年9月

表5 中国海洋等效虚拟水

Table 5 China's marine equivalent virtual water

(亿 m<sup>3</sup>)

年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	海洋等效虚拟水 总量占用水量比重/%
天津	2.65	7.01	0.48	0.74	0.66	0.86	0.76	1.86	2.89	8.58
河北	4.78	4.54	4.49	4.32	4.48	4.22	4.24	4.55	4.84	2.29
辽宁	24.25	23.92	22.44	26.13	25.24	22.49	25.61	25.83	32.46	17.78
上海	3.02	2.54	3.07	2.11	1.79	1.68	1.55	1.19	1.87	1.74
江苏	4.09	4.02	4.25	5.11	4.47	4.46	4.62	4.70	4.79	0.80
浙江	35.64	30.57	29.47	29.68	30.55	30.06	30.88	32.56	32.56	15.45
福建	25.16	27.16	21.18	23.44	21.29	23.36	24.09	23.70	24.37	11.84
山东	22.88	22.78	19.90	19.23	19.81	20.39	20.44	20.48	22.16	9.47
广东	27.99	25.78	27.94	24.74	22.71	20.60	20.38	21.60	21.13	5.17
广西	21.06	11.89	10.14	8.88	7.03	7.82	7.94	8.02	8.52	3.31
海南	10.54	9.43	9.65	9.00	9.53	9.08	9.18	9.72	10.09	21.18
总量	182.05	169.63	153.02	153.37	147.54	145.03	149.69	154.20	165.68	6.38

注:海洋等效虚拟水总量和用水量总量均取2006—2014年数据。

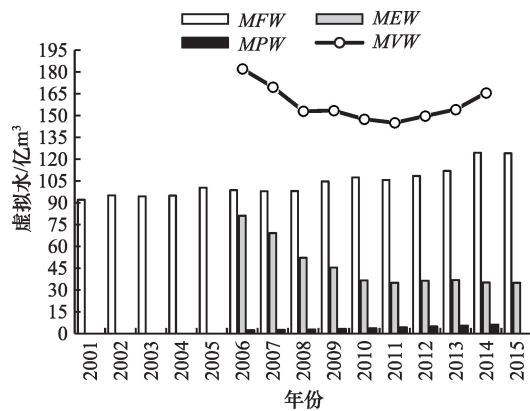


图2 中国海洋等效虚拟水演变趋势

Figure 2 Evolution trend of marine equivalent virtual water in China

捞等效虚拟水(PFW)。从数量上看,由于“海洋捕捞零增长”策略的施行,使得MCW总量于2001—2007年波动下降,自2008年起呈缓慢波动上升,数量基本稳定在55亿~60亿m<sup>3</sup>;确定“以养为主”方针后,MUW明显增长,研究期间由29.14亿m<sup>3</sup>上升至52.72亿m<sup>3</sup>;PFW总量较小,但近年来以年均1.8%的速度增长。从比例上看,MCW占比由63%下降到50%,但产量变化较小,是MFW的最主要来源;MUW占比由31%上升到43%,是MFW主要上升部分;PFW占比在10%以内,并呈现增长趋势。

就MEW而言,总量由2006年的81.08亿m<sup>3</sup>下降到2015年的35.00亿m<sup>3</sup>,以2011年为界,先快速

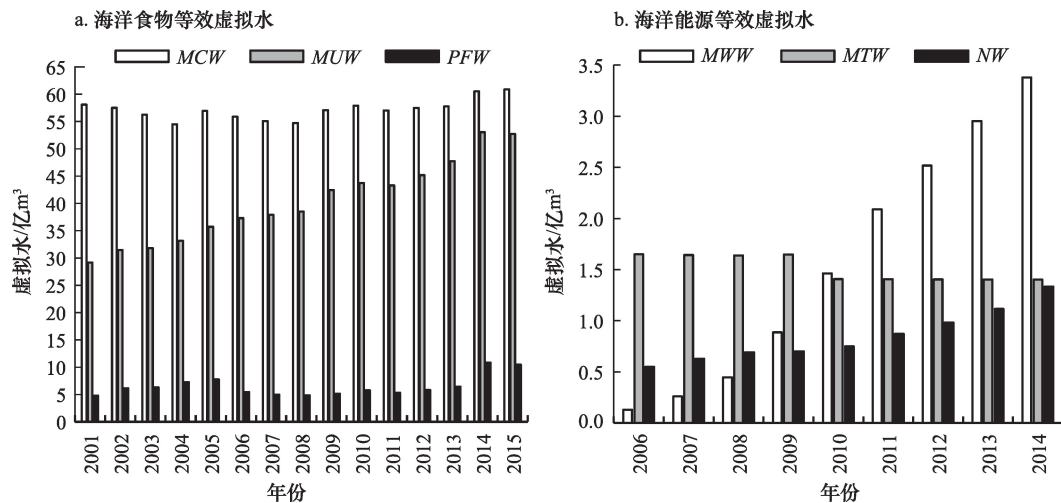


图3 中国海洋食物等效虚拟水、海洋能源等效虚拟水演变趋势

Figure 3 Evolution trend of China's marine food equivalent virtual water and marine energy equivalent virtual water



下降,后逐渐平稳略有波动,占比由45%下降到22%。“十五”期间中国大力发展海洋经济,但粗放式发展给沿海地区海洋环境带来严重的负效应。2005年,中共十六届五中全会提出建设“资源节约型和环境友好型社会”,促进了产业结构的优化升级,同时加强了对高污染行业的监管,增设废水治理设施,使得沿海地区直排海污染源中COD含量由2006年的48.7万t下降到2015年的21万t,氨氮含量由4.7万t下降到1.5万t。*MEW*的获取是以牺牲海洋环境为代价的,其含量的降低和低水平稳定有利于海洋环境的保护。

就*MPW*而言,总量呈直线增长趋势,由2006年的2.33亿 $\text{m}^3$ 上升到2014年的6.11亿 $\text{m}^3$ 。其组成包括海上风电等效虚拟水(*MWW*)、潮汐发电等效虚拟水(*MTW*)和核电等效虚拟水(*NW*)。*MWW*由0.13亿 $\text{m}^3$ 增长至3.37亿 $\text{m}^3$ ,是*MPW*中增速最快的组成部分;*MTW*含量有限,由于电站选址和技术的限制,当前运营的只有浙江的江夏和海山潮汐电站;近年来,由于新核电站的投入使用而实现加速增长,*NW*总量由0.55亿 $\text{m}^3$ 增长至1.33亿 $\text{m}^3$ ,主要集中在部分地区。*MPW*在总量中占比由1.2%上升到3.7%,虽然当前所占比重较小,但清洁能源的推广与使用将意味着海洋能源等效虚拟水的贡献度将不断提高。

研究期间,*MVW*总量呈U型变化趋势,从2006年的182.05亿 $\text{m}^3$ ,先下降到2011年的145.03亿 $\text{m}^3$ ,又上升到2014年的165.68亿 $\text{m}^3$ 。从结构上看,自2006年到2014年,*MFW*:*MEW*:*MPW*由54:45:1转换为75:21:4。若保持当前发展趋势,未来*MVW*将因*MUW*、*MWW*的显著增加而进一步升高。

### 5.2.2 中国海洋等效虚拟水结构性优化方向

中国海洋等效虚拟水发展总体趋好,但依旧存在开发不平衡、环境污染严重、传统资源供给面临挑战等问题。为实现总量规模和保障能力的可持续提高,提出结构性优化方向。

重点开发项目:包括*MUW*、*PFW*、*MWW*和*NW*,是*MVW*结构中发展潜力大、探索空间强的组成部分。

保守开发项目:包括*MCW*、*MTW*,是*MVW*结构中发展速度适中,但由于自然、历史条件等受限所影响的近期无法实现快速发展的组成部分。

限制开发项目:包括*MEW*,是*MVW*结构中通过

牺牲环境而获得效益的部分,需要通过限制增长实现海洋环境的保护。

### 5.3 中国海洋等效虚拟水地区结构性特征分析及优化设计

中国沿海11省市海洋等效虚拟水结构性特征演变如图4所示,根据其变化规律,将沿海地区海洋等效虚拟水演变趋势分为三种类型。

(1)类型I:骤降-缓升型,包括天津、上海、广西、广东四个省市,其中天津、上海和广西的变化由*MEW*主导,广东的变化由*MEW*和*MUW*主导。*MEW*政策敏感程度高,因此形成骤变,特别是天津和上海,*MVW*总量不高,变化更为明显。具体分析及优化设计如下:

天津和上海海岸线短,海域面积小,海洋第一产业发展薄弱,船舶制造等传统产业比重较高,影响*MEW*比重几乎全部高于*MFW*。未来二市要积极发展远洋渔业,拓展公海渔业资源占有率;发挥人才技术优势,进一步提高*MWW*含量;控制排海废水污染物含量,提高环境治理能力。

广西海洋捕捞和海水养殖方式较为粗放,渔业管理体制不健全,当地人口进取精神较为薄弱,*MFW*多年未实现显著增长。21世纪后,承接的部分高耗能、高污染、低技术创新性产业造成*MEW*含量高。未来广西要积极融入“泛珠三角”的建设当中,促进产业结构优化升级,控制*MEW*;积极推进现代化建设和思想文化建设,加强人才引进与科技投入,结合浅滩资源优势促进*MUW*提升。

广东大陆海岸线居全国首位,滩涂面积广阔,南海海域无冰冻期且鱼类丰富。作为国家科技产业创新中心,海洋科研人数较多,同时核电发展领先全国。但广东属于海洋灾害频发区且装备老旧,远洋渔业发展受到限制,同时,海洋渔业直接劳动力质量普遍偏低。未来广东要进一步缩小城乡文化差距,加大渔业基础设施投入;严格落实海洋生态红线制度;促进科技成果转化,实现*MPW*比重进一步提高。

(2)类型II:缓降-缓升型,包括河北、海南、福建、山东、浙江五个省市,前期由*MEW*主导,后期受*MFW*和*MPW*共同影响。河北、海南、福建、山东四地*MFW*比重高于*MEW*;浙江*MEW*比重和含量过

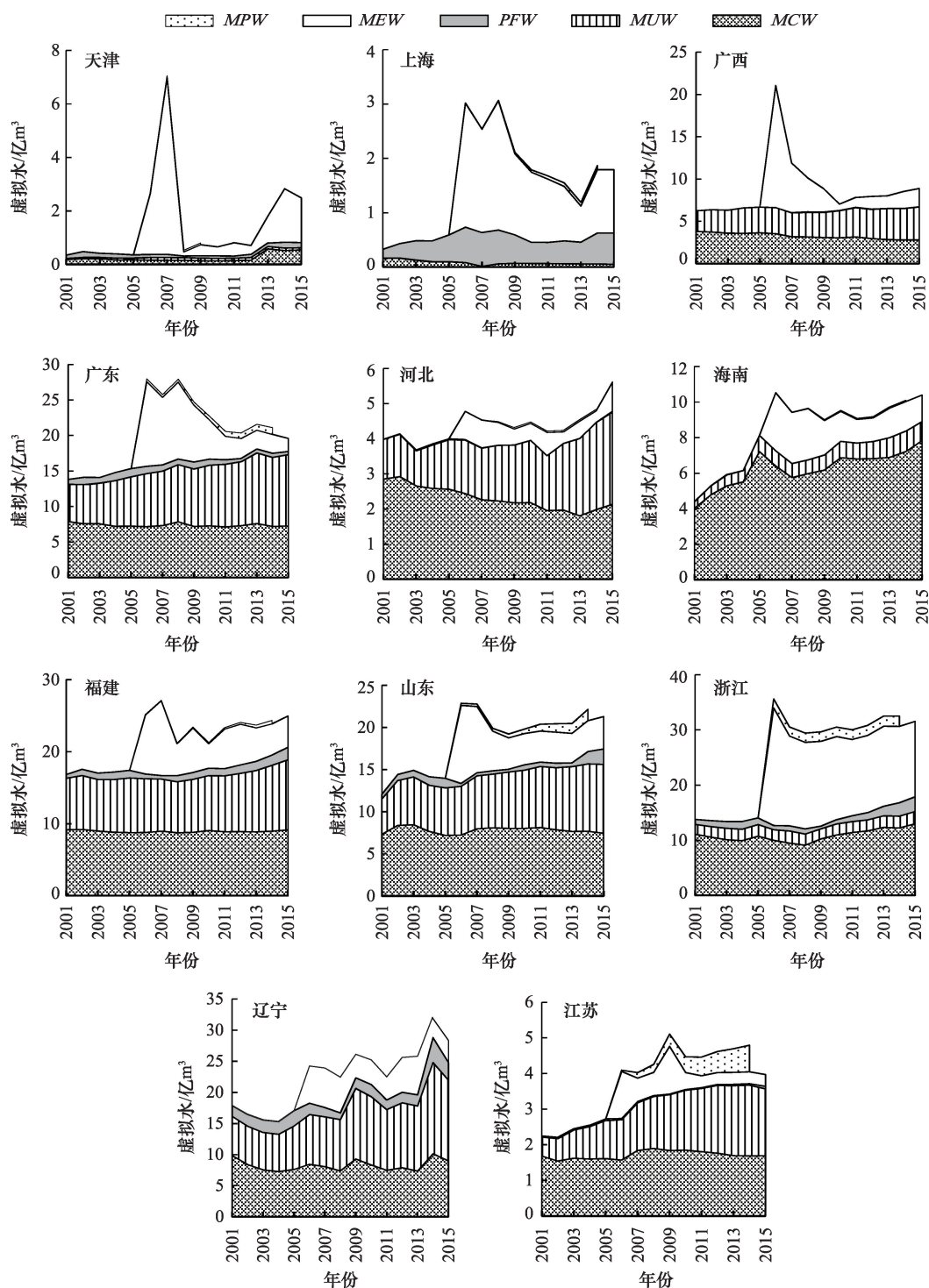


图4 中国沿海地区海洋等效虚拟水结构性特征演变趋势

Figure 4 Evolution trend of marine equipment virtual water structural characteristics in coastal areas of China

高。具体分析及优化设计如下:

河北海岸线较短,近年来近海渔业资源的日益枯竭和海水养殖的发展促进 $MFW$ 的动态增长。海盐化工等资源型传统海洋产业比重较大,但由于海

洋经济总量小加之污水处理能力的提升, $MEW$ 低水平稳定,近岸海域环境趋好。河北未来要加强海洋生态养殖,提高滩涂利用率;养护海域生态环境,保障未来 $MCW$ 发展潜力。

海南海域面积广阔,  $MCW$  占比最高, 但近海利用过度, 中、远海利用不足。海南第三产业发展优于第二产业, 污染型工业 GDP 贡献度较小。海南未来应立足渔业发展优势, 治理南海北部过渔危机, 发展离岸养殖, 同时拓展捕捞范围, 保障  $MFW$  供给。

福建和山东均为海洋大省, 海洋资源得天独厚,  $MFW$  结构相似且发展良好。福建产业结构呈重工业倾向, 虽“十一五”以来经济发展方式转变减少了排海废水量, 但福建属于生态环境敏感区, 易受海洋灾害影响。山东海洋经济发展迅速, 海洋科技实力雄厚, 废水处理率高, 陆海环境保护利用得当。海上风电发展遥遥领先。未来二省要增强环境意识, 提高科研成果转化率, 实现  $MPW$  比重的增长; 增强深水和远海技术装备的研发, 促进深水养殖以及海外捕捞基地建设, 实现  $MFW$  的稳步提高。

浙江发展主要依靠二三产业, 作为工业产品基地, 高 COD 污染物排海的积累使得近岸海域水质状况极差, 海洋生态环境问题严重。海洋渔业资源十分丰富, 特别是  $MCW$  含量和比重均比较高。传统能源短缺, 但海洋区位优势, 海上风电、核电、潮汐发电等工作起步早, 目前  $MPW$  总量位于沿海第二。未来浙江应着力构建污染防治体系, 转移部分低端产业, 提高科技水平; 挖掘海洋多种新能源开发潜力; 提高海水养殖科技实力。

(3) 类型Ⅲ: 波动缓升型, 包括辽宁和江苏两个省份, 二省总体结构变化虽相似, 但数量差距大且影响因素不同。辽宁变化主要由  $MUW$  变化影响, 江苏则比较复杂。二省  $MCW$  均比较稳定,  $MUW$  波动增高,  $MEW$  波动下降。具体分析及优化设计如下:

辽宁面向渤海和黄海, 海洋渔业获取量受到一定限制。粮食作物以低能量值的玉米种植为主, 产量年际波动较大, 使得  $MFW$  总量沿海最高但波动较大。近年来, 废水处理率显著提升, 海上风电和核电的开发逐步发展。未来辽宁要提高陆地作物种植技术, 减小  $MFW$  供给压力; 增强技术开发能力, 促进  $MWW$  和  $NW$  提升; 辽东湾海域相对封闭, 污染物不易消散, 应促进产业结构调整, 降低传统海洋污染型产业比重, 保护海洋敏感区环境。

江苏陆地农业发达, 粮食作物单产高。海洋渔业相较于陆地农业发展较为缓慢, 使得  $MFW$  总量较

少。  $MUW$  增长显著, 但单位产出率依旧较低。污水处理厂个数和效率的提高, 控制了  $MEW$  实现波动下降。近年来海上风电和核电的快速发展使得  $MPW$  省内占比位于沿海首位。江苏未来要健全渔业管理体制, 充分利用好海域和滩涂, 增强海洋养殖业科技创新, 实现海水养殖等效虚拟水的稳步提高; 鼓励新能源开发与使用, 促进  $MWW$ 、 $NW$  保障能力的提高。

## 6 结论与讨论

本文在对虚拟水理论研究的基础上, 提出“海洋等效虚拟水”概念, 以陆海统筹思想为指导, 采取陆海同功能产品或服务可等效转换的思路, 从食物、废水净化、发电三个角度分别提出“海洋食物等效虚拟水”、“海洋环境等效虚拟水”和“海洋能源等效虚拟水”, 探究在海洋开发与利用过程中海洋产品或服务对陆地的淡水资源补给能力。

研究期间, 中国海洋等效虚拟水总量呈 U 型变化趋势, 从数量上看, 总量从 2006 年的 182.05 亿  $m^3$ , 先下降到 2011 年的 145.03 亿  $m^3$ , 又上升到 2014 年的 165.68 亿  $m^3$ 。研究期间海洋等效虚拟水含量占用水量的比例达 6.4%。从结构上看, 从 2006 年到 2014 年, 海洋食物等效虚拟水、海洋环境等效虚拟水和海洋能源等效虚拟水的比例, 由 54:45:1 转换为 75:21:4。若保持当前发展趋势, 未来海洋等效虚拟水将因海水养殖等效虚拟水以及海上风电等效虚拟水的显著增加而实现进一步升高。

根据中国海洋等效虚拟水的结构性特征, 提出适合中国海洋等效虚拟水发展的优化方向, 包括重点开发项目、保守开发项目和限制开发项目。同时, 根据沿海 11 省市海洋等效虚拟水当前变化趋势将其分为三种类型, 并根据其内部结构特征提出具体的优化设计。合理利用海洋实现陆地水资源的等效替代是解决沿海地区未来水资源难题的重要途径。

然而在本文完成过程中, 有几个问题需要在下一步研究中继续探索:

(1) 沿海省份排海废水主要包括两部分, 一是通过排污管道直接排海, 二是通过河流汇集排海。但由于统计数据限制, 仅选择直排海方式进行海洋环境等效虚拟水计算, 会使得计算结果偏小; 对于同一省市来说, 火电厂的规模、冷却方式、装机容量等存在差异, 单位发电耗水量难以确定具体数值,



2018年9月

只考虑南北差异会影响计算结果的准确性。

(2)本文的研究主体是在海洋产品或服务等效于陆地产品或服务的虚拟水,而以海水淡化为代表的实体水同样是海洋对陆地水资源的补充,将二者进行结合,可开展对陆海水资源整合更为全面的探究。

应该指出的是,由于海洋等效虚拟水的概念及内涵尚不完善,加之资料限制,因此本文只是得到一个初步性的研究成果,但期望成果能够起到抛砖引玉的作用,吸引更多的学者关注这个领域。

### 参考文献(References):

- [1] 谷树忠, 成升魁. 中国资源报告—新时期中国资源安全透视[M]. 北京: 商务印书馆, 2010. [Gu S Z, Cheng S K. China Resource Report—Perspective of China's Resources Security in New Era [M]. Beijing: Commercial Press, 2010. ]
- [2] Arrow K, Bolin B, Costanza R, et al. Economic growth, carrying capacity, and the environment[J]. *Science*, 1995, 268(5210): 520–521.
- [3] 康绍忠. 水安全与粮食安全[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 880–885. [Kang S Z. Towards water and food security in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(8): 880–885. ]
- [4] 曹忠祥, 高国力. 我国陆海统筹发展的战略内涵、思路与对策[J]. 中国软科学, 2015, (2): 1–12. [Cao Z X, Gao G L. The connotation of and policy recommendation for overall planning development of land and sea in China [J]. *China Soft Science*, 2015, (2): 1–12. ]
- [5] Allan J A. Fortunately There Are Substitutes for Water Otherwise Our Hydro-political Futures Would Be Impossible[C]. London: ODA, 1993.
- [6] Hoekstra A Y. Perspectives on Water: A Model-based Exploration of the Future [D]. Delft: Delft University of Technology, 1998.
- [7] 韩雪. 我国主要农产品虚拟水流动格局形成机理与维持机制[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2013. [Han X. Research on Formation Mechanism and Support Mechanism of Virtual Water Flows Pattern Embedded in Major Agriculture Products Trade [D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2013. ]
- [8] 柳长顺, 陈献, 刘昌明, 等. 虚拟水交易: 解决中国水资源短缺与粮食安全的一种选择[J]. 资源科学, 2005, 27(2): 10–15. [Liu C S, Chen X, Liu C M, et al. Virtual water trade: an alternative for solving water shortage and ensuring food security in China [J]. *Resources Science*, 2005, 27(2): 10–15. ]
- [9] Zhang Y, Zhang J H, Tian Q, et al. Virtual water trade of agricultural products: a new perspective to explore the Belt and Road [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622–623: 988–996.
- [10] Fracasso A. A gravity model of virtual water trade [J]. *Ecological Economics*, 2014, 108: 215–228.
- [11] Serrano A, Guan D, Duarte R, et al. Virtual water flows in the EU27: a consumption-based approach[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, 20(3): 547–558.
- [12] 谭圣林, 邱国玉, 熊育久. 投入产出法在虚拟水消费与贸易研究中的新应用[J]. 自然资源学报, 2014, 29(2): 355–364. [Tan S L, Qiu G Y, Xiong Y J. New application of the input-output framework in the study of virtual water consumption and trade [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(2): 355–364. ]
- [13] 徐建伟, 葛岳静, 胡志丁. 比较优势、国际分工与发展战略[J]. 经济地理, 2012, 32(5): 16–22. [Xu J W, Ge Y J, Hu Z D. Comparative advantage, international labour division and development strategy [J]. *Economic Geography*, 2012, 32(5): 16–22. ]
- [14] 张新林, 赵媛. 基于空间视角的资源流动内涵与构成要素的再思考[J]. 自然资源学报, 2016, 31(10): 1611–1623. [Zhang X L, Zhao Y. Rethinking of connotation and constituent elements of resources flow based on spatial perspective [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(10): 1611–1623. ]
- [15] 刘宝勤, 封志明, 姚治君. 虚拟水研究的理论、方法及其主要进展[J]. 资源科学, 2006, 28(1): 120–127. [Liu B Q, Feng Z M, Yao Z J. Theory, method and progress on virtual water research [J]. *Resources Science*, 2006, 28(1): 120–127. ]
- [16] 蔡莉. 中国新东部海洋渔业资源人口承载力研究(2010–2020) [M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2012. [Cai L. Study on Population Carrying Capacity of Marine Fishery Resources in New east China (2010–2020) [M]. Beijing: China Social Sciences Press, 2012. ]
- [17] 戈华清, 蓝楠. 我国海洋陆源污染的产生原因与防治模式[J]. 中国软科学, 2014, (2): 22–31. [Ye H Q, Lan N. Causes and prevention mode on marine pollution from the land-based activities or sources (MPLBA) in China [J]. *China Soft Science*, 2014, (2): 22–31. ]
- [18] 张丽艳, 冯杰, 杨涛. 我国火电行业用水效率分析与节水对策[J]. 水电能源科学, 2012, 30(2): 190–192. [Zhang L Y, Feng J, Yang T. Water use efficiency in thermal power industry and countermeasures for water-saving in China [J]. *Water Resources and Power*, 2012, 30(2): 190–192. ]
- [19] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, 等. 水足迹评价手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. [Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. Handbook of Water Footprint Assessment [M]. Beijing: Science Press, 2012. ]
- [20] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001–2016. [Fisheries Administration Bureau of the Ministry of Agriculture. China Fisheries Statistics Yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001–2016. ]
- [21] 项潇智, 贾绍凤. 中国能源产业的现状需水估算与趋势分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(1): 114–123. [Xiang X Z, Jia S F. Estimation and trend analysis of water demand of energy industry in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(1): 114–123. ]
- [22] 钟锐, 赵鹏, 张宏伟, 等. 国际能源贸易中的能源隐含水流动及其对各国水资源影响[J]. 资源科学, 2014, 36(1): 103–109. [Zhong R, Zhao P, Zhang H W, et al. Global embodied water flows in relation to energy trade and its effect on water resources [J]. *Resources Science*, 2014, 36(1): 103–109. ]
- [23] 洪思扬, 王红瑞, 来文立, 等. 我国能源耗水空间特征及其协调发展脱钩分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(5): 800–813. [Hong S Y, Wang H R, Lai W L, et al. Spatial analysis and coordinated development decoupling analysis of energy-consumption water in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(5): 800–813. ]
- [24] 国家统计局. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2002–2016. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Rural Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2002–2016. ]
- [25] 杨月欣, 王光亚, 潘兴昌. 中国食物成分表[M]. 北京: 北京大学

- 医学出版社, 2009. [Yang Y X, Wang G Y, Pan X C. China Food Composition [M]. Beijing: Peking University Medical Press, 2009. ]
- [26] 石玉林, 卢良恕. 中国农业需水与节水高效农业建设[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. [Shi Y L, Lu L S. Agricultural Water Demand and Water-saving and Efficient Agriculture Construction in China [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2001. ]
- [27] 中华人民共和国环境保护部. 中国近岸海域环境质量公报[EB/OL]. (2017-06-29)[2017-09-10]. <http://www.zhb.gov.cn/hjzl/shj/jagb/>. [Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Bulletin of the Environmental Quality of China's Coastal Waters[EB/OL]. (2017-06-29)[2017-09-10]. <http://www.zhb.gov.cn/hjzl/shj/jagb/>. ]
- [28] GB8978—1996, 污水综合排放标准[S]. [GB8978—1996, Integrated Wastewater Discharge Standard[S]. ]
- [29] 国家海洋局. 中国海洋统计年鉴[M]. 北京: 海洋出版社, 2007–2015. [State Oceanic Administration. China Marine Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Ocean Press, 2007–2015. ]
- [30] 吕曰恒. 山东白沙口潮汐电站综合开发前景广阔[J]. 海洋技术, 2001, 20(3): 27–27. [Lv Y H. Comprehensive development prospect of tidal power station in Baisha estuary, Shandong [J]. *Journal of Ocean Technology*, 2001, 20(3): 27–27. ]
- [31] 林楚平. 海山潮汐能的综合开发利用[J]. 水利水电技术, 1999, 30(1): 33–34. [Lin C P. Comprehensive utilization of tidal energy in Haishan [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 1999, 30(1): 33–34. ]
- [32] 中国电力发展促进会. 中国电力年鉴[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007–2015. [China Electric Power Development Association. China Electric Power Yearbook [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007–2015. ]

## Preliminary calculation and structural analysis of China's marine equivalent virtual water

SUN Caizhi, ZHANG Mengfei

(Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

**Abstract:** The article puts forward the concept of marine equivalent virtual water. Under the guidance of land-sea coordination and according the idea that products and services in the same function between the sea and land can be converted equivalently, “marine food equivalent virtual water”, “marine environment equivalent virtual water, ” and “marine energy equivalent virtual water” are initiated from the perspectives of food, wastewater purification, and power generation. Taking the coastal areas of China as the research region, the replenishment capacity of marine products or services for terrestrial freshwater resources were explored in the process of marine development and utilization. The results showed that the total amount of China marine equivalent virtual water is U-shape trend. It fell from 18.2 billion m<sup>3</sup> in 2006 to 14.5 billion m<sup>3</sup> in 2011, and then rose to 16.6 billion m<sup>3</sup> in 2014. During the study period, the content of marine equivalent virtual water occupies the proportion of water consumption to reach 6.4%. The increase of marine culture equivalent virtual water and marine wind equivalent energy virtual water will promote the amount of marine equivalent virtual water in the future. Meanwhile, this paper demonstrates the optimization direction based on the structural characteristics of marine virtual water in China, and consolidates the specific optimization design based on the structural characteristics of marine equivalent virtual water of the provinces and cities. It will provides a reference for the improvement of marine equivalent virtual water in coastal areas of China. The stable supply of marine equivalent virtual water must be realized under the precondition of sustainable development of marine resources and environments. It is an important way to solve the problems of water resources in the future by utilizing the ocean to replenish land water resources rationally.

**Key words:** marine equivalent virtual water; marine food equivalent virtual water; marine environment equivalent virtual water; marine energy equivalent virtual water; coastal areas of China